第47卷 第2期
2024年2月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 47 No. 2
Feb. 2024

区域社会-生态系统恢复力协调发展时空演变研究
——以陕西省为例

黄 娇[1,2]， 陈 海[1,2]， 王佳宇[1,2]， 白晓娟[1,2]

（1. 西北大学城市与环境学院,陕西 西安 710127；
2. 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室,陕西 西安 710127）

摘 要：在人口增长、资源开发、城镇化等多因素驱动下,恢复力为区域社会-生态系统可持续发展提供了新的研究视角。以陕西省为研究区,基于社会、经济、生态3个子系统,综合考虑系统的脆弱性与应对能力构建指标体系,通过集对分析法对陕西省107个县级行政单元的社会-生态系统恢复力进行测度,根据恢复力测度结果,运用耦合协调度模型分析二元(社会-经济、社会-生态、经济-生态)及三元(社会-经济-生态)子系统的协调发展程度,从区域层面揭示其2000—2020年的时空演变特征,然后引入双变量空间自相关模型进一步探究二元与三元子系统协调发展度变化的数量及空间关联特征。结果表明:(1) 研究期间陕西省社会、经济恢复力增长显著,生态恢复力呈微弱的下降趋势,社会-生态系统恢复力由0.303上升至0.779。(2) 子系统协调发展度均呈上升趋势,社会-经济子系统南高北低的协调发展差异减弱,社会-生态、经济-生态子系统形成中部低南北高的协调发展格局,社会-经济-生态子系统协调发展度整体维持南高北低的空间分布特征。(3) 二元子系统协调发展变化在数量及空间上与三元子系统协调发展变化有较大的正向关联性,以高-高、低-低类型评价单元在省域北部、中部的集中分布为主。

关 键 词：社会-生态系统恢复力；协调发展；双变量相关性；陕西省
文章编号：1000－6060(2024)02－0343－13(0343～0355)

社会-生态系统是基于社会系统和生态系统之间相互影响、相互作用形成的耦合系统,兼具系统整体性、内部层次性、复杂性与不确定性等特征[1-2]。恢复力作为社会-生态系统的关键属性[3],被定义为系统经受干扰并能够维持自身结构、功能、特性及反馈的能力[4],在快速城镇化、人口增长及气候变化等环境背景下为该领域的研究提供了新的思路。随着恢复力从生态恢复力向社会-生态系统恢复力的演变[5],社会-生态系统恢复力的测度及其协调发展时空演变的探讨已成为研究热点[6-8],这对于提升区域社会-生态系统恢复力和促进其可持续发展意义重大[9]。

国内外学者已就社会-生态系统恢复力的测度与评估开展了广泛研究,涉及国家[10]、省市[11-12]、景观[13]等多个尺度,研究对象主要集中于旅游开发[14]、采矿活动[15]、气候[16]及自然灾害[17]等单一扰动因素的社会-生态系统,目前少有研究以县域为评价单元对多元因素驱动下的区域社会-生态系统恢复力进行分析。在恢复力理论背景下,恢复力的定量评价是进一步理解社会-生态系统恢复力变化机制的关键,当前对社会-生态系统恢复力的评估仍未形成统一的范式,测度方法主要包括模型评估[18-19]和替代性指标体系评价[6],部分研究通过探讨脆弱性与恢复力[20]的关系,仅在脆弱性模型[21]的基础上对系统恢复力进行量化[22],还缺少对应对能力的关注。目前,诸多研究以社会、经济、生态等子系统为

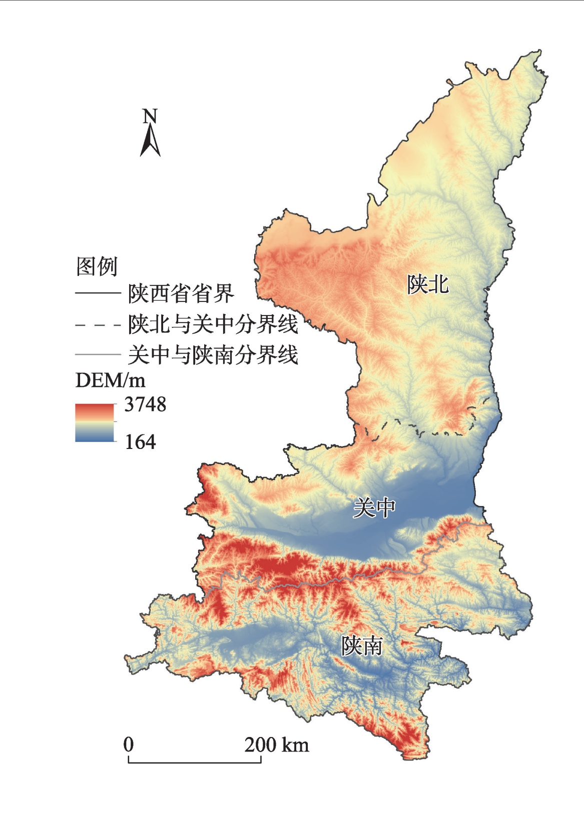
收稿日期：2023-04-08； **修订日期**：2023-05-26
基金项目：国家自然科学基金项目(42171256)资助
作者简介：黄娇(1998-),女,硕士研究生,主要从事社会-生态系统恢复力研究. E-mail: huangjiao@stumail.nwu.edu.cn
通讯作者：陈海(1971-),男,教授,主要从事生态系统服务与人类福祉等方面的研究. E-mail: chw@nwu.edu.cn

测度单元，基于脆弱性与应对能力2个层面构建指标体系，进而通过综合指数法、集对分析等实现社会-生态系统恢复力的定量评价[10,14]。其中，集对分析作为一门处理不确定性问题的系统理论方法[23]，已在脆弱性评价、安全评价、多属性决策等[24-26]领域得以广泛应用，其在具有复杂且不确定性等特征的社会-生态系统恢复力量化方面具有一定的优势[27]。在对社会-生态系统恢复力进行评价的基础上，现有研究主要侧重于运用回归分析[28]、障碍度模型[29]等方法分析社会-生态系统恢复力的影响因素，对社会-生态系统恢复力协调发展的时空演变研究较少，既有的恢复力协调发展研究[7-8]表明耦合系统恢复力强调系统内部之间的协调和融合关系，系统的健康发展需要子系统间的协调演进，探究各子系统恢复力的相互协调关系可更好地反映社会-生态系统的发展状况。

鉴于此，本文以受城镇化发展、资源开发及气候等多因素影响的陕西省社会-生态系统为研究对象，将其划分为社会、经济、生态3个子系统构建评价指标体系，采用集对分析法，以县域为评价单元对陕西省2000—2020年的社会-生态系统恢复力进行测度，基于恢复力测度结果，运用二元及三元耦合协调度模型分析社会-生态系统的协调发展水平，从区域层面揭示二元（社会-经济、社会-生态、经济-生态）和三元（社会-经济-生态）子系统协调发展度的时空演变特征，并通过灰色关联度及双变量空间自相关模型进一步探讨二元与三元子系统协调发展变化间的数量关联度与空间相关关系，研究可为区域社会-生态系统的可持续性管理与发展策略制定提供理论依据与决策支持。

1 研究区概况

陕西省（31°42′N～39°35′N，105°29′E～111°15′E）位于中国中部，黄河中游地区，土地面积2.056×10^5 km²，地势南北高、中间低，在地理空间上形成陕北黄土高原、关中平原、陕南秦巴山地3个自然区（图1），气温、年平均降水量由南向北逐渐降低。陕北地区地形破碎、千沟万壑，属于半干旱区，生态环境脆弱；关中平原介于陕北黄土高原与秦岭山地之间，地势平坦、气候温和；陕南地区秦岭、巴山及汉江盆地形成“两山夹一川”的地貌结构，为湿润区，年降水量



注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)1822号的标准地图制作，底图边界无修改。下同。

图1 研究区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the study area

大，滑坡、山洪等地质灾害频发。陕西省下辖10个地级市，共107个县级行政单元，截至2020年，陕西省常住人口3.955×10^7人，地区生产总值2.618×10^{12}元。陕北地区能源丰富、能源工业地位突出、经济发展迅速；关中地区人口密集、交通便利、产业多样化发展、经济条件优越；陕南地区经济基础薄弱，产业发展受山地地形及生态保护的限制，工业化程度较低，社会经济效益不高。陕北、关中、陕南三大自然区差异显著的自然地理环境、社会经济发展水平，加之拥有多样的社会-生态系统，为区域社会-生态系统恢复力协调发展的时空演变分析提供了良好的研究区。

2 数据与方法

2.1 数据来源与处理

本研究数据主要来源于：（1）社会经济数据。源自2000、2020年的《中国县域统计年鉴》《陕西统计年鉴》《陕西区域统计年鉴》、陕西省各地市统计年鉴及相关区县国民经济和社会发展统计公报等

公开资料，部分缺失数据由增长率推算或相邻年份代替。(2)土地利用数据。2000、2020年的土地利用数据来源于中国西部环境与生态科学数据中心的陕西省1:100000土地利用矢量数据集，重采样为30 m的地类栅格，将地类分为耕地、林地、草地、水域、建设用地及未利用地6类，按照陕西省县级行政区划对其进行提取分析与栅格面积计算。为消除指标的量纲和数量级差异，根据指标影响性质，采用极值法对数据进行标准化处理。在综合指标体系测度中，客观赋权法根据各指标所提供的信息量来决定指标的权重，为避免主观因素带来的偏差，采用熵权法确定指标权重，具体计算步骤见参考文献[30]。

2.2 指标体系构建

恢复力测度指标的选取因区域特性、系统类型、要素选择及研究视角等不同而产生差异，目前关于恢复力评价指标体系的构建尚未形成统一的范式。理论上恢复力测度由社会、经济、生态、政策和文化5个要素组成，其中政策和文化多通过其他因素的影响而显现[12]。在外部扰动作用下，系统不稳定性和抗性作为恢复力测度的主要因子，可分别通过系统的脆弱性和应对能力来表征[27,29]，其中脆弱性反映系统在受到扰动后结构和功能受到损害的程度，是系统所受压力和自身敏感性相互作用的结果[7,31]，应对能力是系统通过自身完善和结构调整对干扰的抵抗程度[8]。因此，参考相关研究[7,27,32]，从研究尺度、地区基本情况、系统可持续发展等方面出发，选取社会、经济和生态3个子系统为测度单元，以区域自然地理环境和人类活动驱动作用下引发的各子系统脆弱性因子来衡量系统的不稳定性，选取利于各子系统发展并在一定程度上有助于系统恢复力提升的应对能力因子来衡量系统的抗性，通过相关性分析，遵循系统性、代表性、数据可获得性等原则，共遴选出20项指标因子(表1)，对陕西省社会-生态系统恢复力进行测度。

社会子系统主要考虑社会的稳定性、抵御风险的能力和学习能力。人口密度衡量人口特征；粮食产量评价基本物质条件；社会消费品零售总额、地方财政支出表征消费水平和财政支持力度；中小学在校生人数反映教育普及及学习能力；万人拥有医疗卫生机构床位数衡量医疗卫生服务提供能力。

表1 陕西省社会-生态系统恢复力评价指标体系

Tab. 1 Evaluation index system of social-ecological system resilience in Shaanxi Province

子系统层	准则层	指标层	指标含义及性质	权重
社会子系统	脆弱性	人口密度/人·km^{-2}	衡量系统压力(-)	0.0023
		粮食产量/t	衡量粮食供应能力(+)	0.0486
		社会消费品零售总额/10^{4}元	衡量系统消费水平(+)	0.1433
	应对能力	地方财政支出/10^{4}元	衡量社会财政支持力度(+)	0.0284
		万人拥有医疗卫生机构床位数/张	衡量医疗卫生服务能力(+)	0.0581
		中小学在校生人数/人	衡量系统学习能力(+)	0.0416
经济子系统	脆弱性	农林牧渔业总产值/10^{4}元	衡量系统生产能力(+)	0.0359
		规模以上工业总产值/10^{4}元	衡量工业发展水平与规模(+)	0.1216
		金融机构贷款余额/10^{4}元	衡量系统发展的资金需求(-)	0.0042
		产业结构多样化指数	衡量产业发展的平衡程度(+)	0.0110
	应对能力	地方财政收入/10^{4}元	衡量地方政府财力(+)	0.0900
		GDP/10^{8}元	衡量系统经济总量(+)	0.0878
		人均可支配收入/元	衡量居民收入水平(+)	0.0372
		全社会固定资产投资额/10^{4}元	衡量资本投资额度(+)	0.0750
生态子系统	脆弱性	土地利用程度	衡量土地开发利用程度(-)	0.0076
		化肥施用强度/t·hm^{-2}	衡量系统生态威胁(-)	0.0050
		农用塑料薄膜使用强度/kg·hm^{-2}	衡量系统环境压力(-)	0.0038
	应对能力	造林面积比例/%	衡量地区生态建设水平(+)	0.0746
		生物丰度	衡量系统生物丰贫程度(+)	0.0123
		人均林草地面积/hm^2	衡量系统自然条件(+)	0.1118

注：指标数据越大越有利于系统发展(增强系统恢复力)的指标列为正向(+)指标；指标数据越小越有利于系统发展(增强系统恢复力)的指标列为负向(-)指标。

经济子系统映射经济的发展和支撑能力，农林牧渔业总产值、规模以上工业总产值代表生产能力与产业发展规模；金融机构贷款余额反映资金需求程度；产业结构多样化指数采用赫芬达尔指数的倒数计算[33]，衡量产业发展的平衡程度；GDP、人均可支配收入和财政收入表示经济实力；全社会固定资产投资反映资本投资额度。生态子系统主要考虑生态本底条件和生态胁迫因素，化肥施用强度和农用塑料薄膜使用强度作为反映生态压力的指标；造林面积比例反映绿化环保力度；生物丰度[34-35]、人均林草地面积反映生态功能及生态平衡状况；土地利用程度[36]用以衡量人类对区域土地利用的广度和深度。

2.3 研究方法

2.3.1 集对分析法 基于集对分析进行多属性评价，记为 $Q=\{F, D, E, W\}$，其中，评价方案集 $F=\{f_1, f_2, \cdots, f_m\}$，评价指标集 $D=\{d_1, d_2, \cdots, d_n\}$，评价对象集 $E=\{e_1, e_2, \cdots, e_k\}$，评价指标权重集 $W=\{w_1, w_2, \cdots, w_n\}$，在同一空间内进行对比确定各评价方案中的最优指标构成最优评价集 $U=\{u_1, u_2, \cdots, u_n\}$，各评价指标中最劣评价指标构成最劣评价集 $V=\{v_1, v_2, \cdots, v_n\}$，其中 u_n、v_n 分别为指标的最优值和最劣值。建立集对 $\{F_m, U\}$ 在 $[U, V]$ 上的联系度为：

$$\begin{cases}\mu(f_m,U)=a_m+b_m i+c_m j\\ a_m=\sum w_p a_{pk} \qquad p=1, 2, \cdots, n\\ c_m=\sum w_p c_{pk}\end{cases} \tag{1}$$

式中：μ 为集合的联系度；f_m 为评价方案；a_m 为同一度；b_m 为差异度；c_m 为对立度；i 和 j 分别为差异度和对立度系数；a_{pk} 和 c_{pk} 分别为评价指标 d_{pk} 与集合 $[v_p, u_p]$ 的同一度和对立度；w_p 为第 p 项指标的权重。

当 d_{pk} 对评价结果起正向作用时，

$$\begin{cases}a_{pk}=\dfrac{d_{pk}}{u_p+v_p}\\ c_{pk}=\dfrac{u_p v_p}{d_{pk}(u_p+v_p)}\end{cases} \tag{2}$$

当 d_{pk} 对评价结果起负向作用时，

$$\begin{cases}a_{pk}=\dfrac{u_p v_p}{d_{pk}(u_p+v_p)}\\ c_{pk}=\dfrac{d_{pk}}{u_p+v_p}\end{cases} \tag{3}$$

方案 f_m 与最优方案集 U 的相对贴近度 r_m 可定义为：

$$r_m=\frac{a_m}{a_m+c_m} \tag{4}$$

式中：r_m 反映了被评方案 f_m 与最优方案集 U 的联系度，r_m 值越大表示被评价对象越接近最优方案。

2.3.2 耦合协调度模型 耦合协调度模型包括耦合度和协调度，可用于描述2个或多个系统间的相互作用程度及协调发展水平[37-38]。引入耦合协调度模型，借鉴已有研究成果[39]将协调发展度分为10个评价等级（表2），分析社会、经济、生态子系统恢复力间的相互作用关系及协调状态，以进一步反映社会–生态系统协调发展变化程度。

表2 协调发展阶段及程度

Tab. 2 Coordinated development stage and degree

协调发展度区间	协调阶段	协调发展程度
0.0~0.1	D1：失调衰退阶段（0.0~0.4）	极度失调（D11）
0.1~0.2		严重失调（D12）
0.2~0.3		中度失调（D13）
0.3~0.4		轻度失调（D14）
0.4~0.5	D2：过渡调和阶段（0.4~0.6）	濒临失调（D21）
0.5~0.6		勉强协调（D22）
0.6~0.7	D3：协调发展阶段（0.6~1.0）	初级协调（D31）
0.7~0.8		中级协调（D32）
0.8~0.9		良好协调（D33）
0.9~1.0		优质协调（D34）

王淑佳等[40]修正后的耦合度模型加大了耦合度（C）值的区分度且在测量效度上更佳，因此，本文运用耦合度修正模型构建二元及三元子系统耦合协调度模型如下：

当 $n=2$ 时，假定 $\max U_i$ 为 U_2，得到二元子系统耦合协调度模型：

$$\begin{gathered}C=\sqrt{\left[1-\sqrt{(U_2-U_1)^2}\right]\times\frac{U_1}{U_2}}=\sqrt{\left[1-(U_2-U_1)\right]\times\frac{U_1}{U_2}}\\ T=\alpha U_1+\beta U_2\\ D=\sqrt{C\times T}\end{gathered} \tag{5}$$

当 $n=3$ 时，假定 $\max U_i$ 为 U_3，得到三元子系统耦合协调度模型：

$$\begin{gathered}C'=\\ \sqrt{\left[1-\frac{\sqrt{(U_3-U_1)^2}+\sqrt{(U_2-U_1)^2}+\sqrt{(U_3-U_2)^2}}{3}\right]\times\sqrt{\frac{U_1}{U_3}\times\frac{U_2}{U_3}}}\\ T'=\alpha U_1+\beta U_2+\gamma U_3\\ D'=\sqrt{C'\times T'}\end{gathered} \tag{6}$$

式中：U_1、U_2、U_3 分别为社会、经济、生态子系统恢

复力；C、C' 为耦合度；T、T' 为协调度；D、D' 为系统协调发展度；α、β、γ 为待定权重。本文认为3个子系统同等重要，取式(5)中 $\alpha=\beta=0.5$，取式(6)中 $\alpha=\beta=\gamma=\frac{1}{3}$。

2.3.3　双变量空间自相关　双变量空间自相关分析能揭示空间变量与邻近空间上其他变量的相关性[41]。本研究借助GeoDa1.18软件，基于邻接关系建立空间权重矩阵，通过双变量空间自相关对二元与三元子系统协调发展变化的空间相关关系进行探究。

运用双变量全局空间自相关分析整个研究区内两变量的空间关联性[42]，利用全局Moran's I进行表征，公式为：

$$I=\frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}W_{ij}(x_i-\bar{x})(y_j-\bar{y})}{S^2\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}W_{ij}} \tag{7}$$

采用双变量局部空间自相关进一步反映局部区域中两变量的集聚性与分异特征[43]，利用局部Moran's I进行表征，公式为：

$$I_i=z_i\sum_{j=1}^{n}W_{ij}z_j \tag{8}$$

式中：I、I_i 分别为双变量全局和局部Moran's I，Moran's I取值[−1, 1]，Moran's I>0表示存在空间正相关，Moran's I<0表示存在空间负相关，Moran's I=0表示不存在空间关联性，即随机分布；W_{ij} 为空间单元 i 和 j 的空间权重矩阵；x_i、y_j 分别为自变量、因变量在空间单元 i、j 的值；$\bar{x}$、$\bar{y}$ 分别为自变量、因变量的平均值；S^2 为所有空间单元中变量值的方差；z_i、z_j 为方差标准化的空间单元变量值。根据 I_i 形成高-高聚集、低-低聚集、高-低聚集和低-高聚集4种聚类模式，在此基础上绘制LISA分布图。

3　结果与分析

3.1　社会-生态系统恢复力测度结果与变化趋势分析

分别计算2000、2020年各区域恢复力，得到社会-生态系统恢复力的整体变化情况(图2)。

3.1.1　子系统恢复力变化趋势分析　2000—2020年陕西省社会恢复力由0.323上升为0.729，陕南、关中、陕北社会恢复力分别从0.296、0.411、0.164增长至0.706、0.765、0.675，伴随着城镇化的高速发展，各地区财政支持力度增强，基础设施配套日渐完善，教育、医疗、社会保障等社会事业得以快速发展，人民生活环境与生活质量不断提高，地区之间的社会发展差异逐渐缩小，社会恢复力均具增长趋势。陕西省经济恢复力由2000年的0.217大幅上升为2020年的0.847，陕南、关中、陕北经济恢复力分别从0.185、0.267、0.144增长至0.796、0.877、0.839，陕南积极调整产业结构，经济恢复力上升趋势显著；关中经济增长速率快且竞争力强，经济恢复力始终居于首位；陕北在以石油、煤炭、天然气等为主的能源开采和加工产业的兴起下，经济总量不断升高，经济恢复力增幅最大。2000—2020年陕西省生态恢复力由0.635微弱降低至0.622，陕南、关中、陕北生态恢复力分别从0.728、0.552、0.710变化为0.720、0.542、0.684，陕南森林覆盖率高，生态恢复力始终高于关中和陕北；关中城市集中分布，生态恢复力始终处于末位；陕北随着造林面积的逐渐减少，生态恢复力具有微弱下降的变化态势。

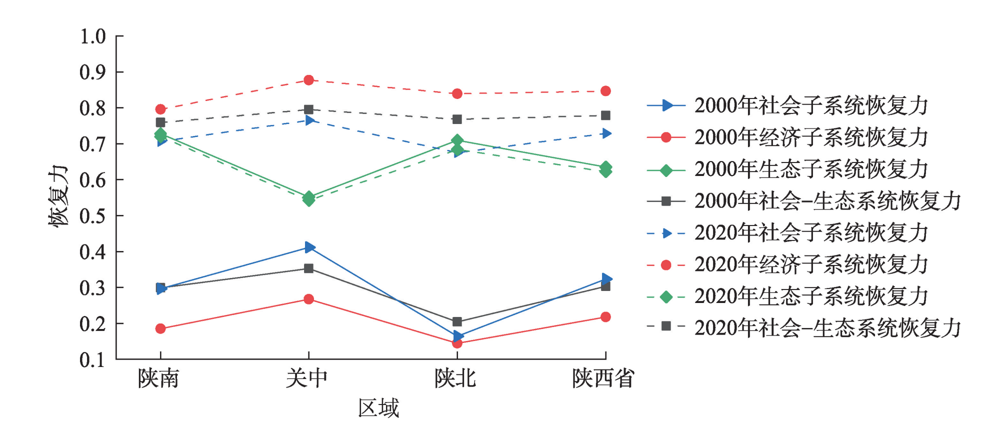


图2　2000—2020年陕西省社会-生态系统恢复力

Fig. 2　Social-ecological system resilience in Shaanxi Province from 2000 to 2020

3.1.2 社会-生态系统恢复力变化趋势分析 2000—2020年陕西省社会-生态系统恢复力从0.303显著上升至0.779。陕南、关中、陕北社会-生态系统恢复力分别从0.299、0.352、0.204变化为0.759、0.795、0.768。陕南社会、经济恢复力提升显著,社会-生态系统恢复力也随之增长;关中平坦的地势、便利的交通等为社会、经济的发展提供了良好的基础条件,社会-生态系统恢复力水平最高;陕北经济恢复力增幅大且绿化建设下生态恢复力维持在较高水平,社会-生态系统恢复力增长态势显著。

3.2 社会-生态系统协调发展时空变化分析

根据恢复力测度结果,依据公式(5)和(6),分别计算2000、2020年各评价单元二元、三元子系统的协调发展度,并按前文所述评价等级(表2)得到各区域协调阶段的县域数量占比情况(表3)和时空分异图(图3)。

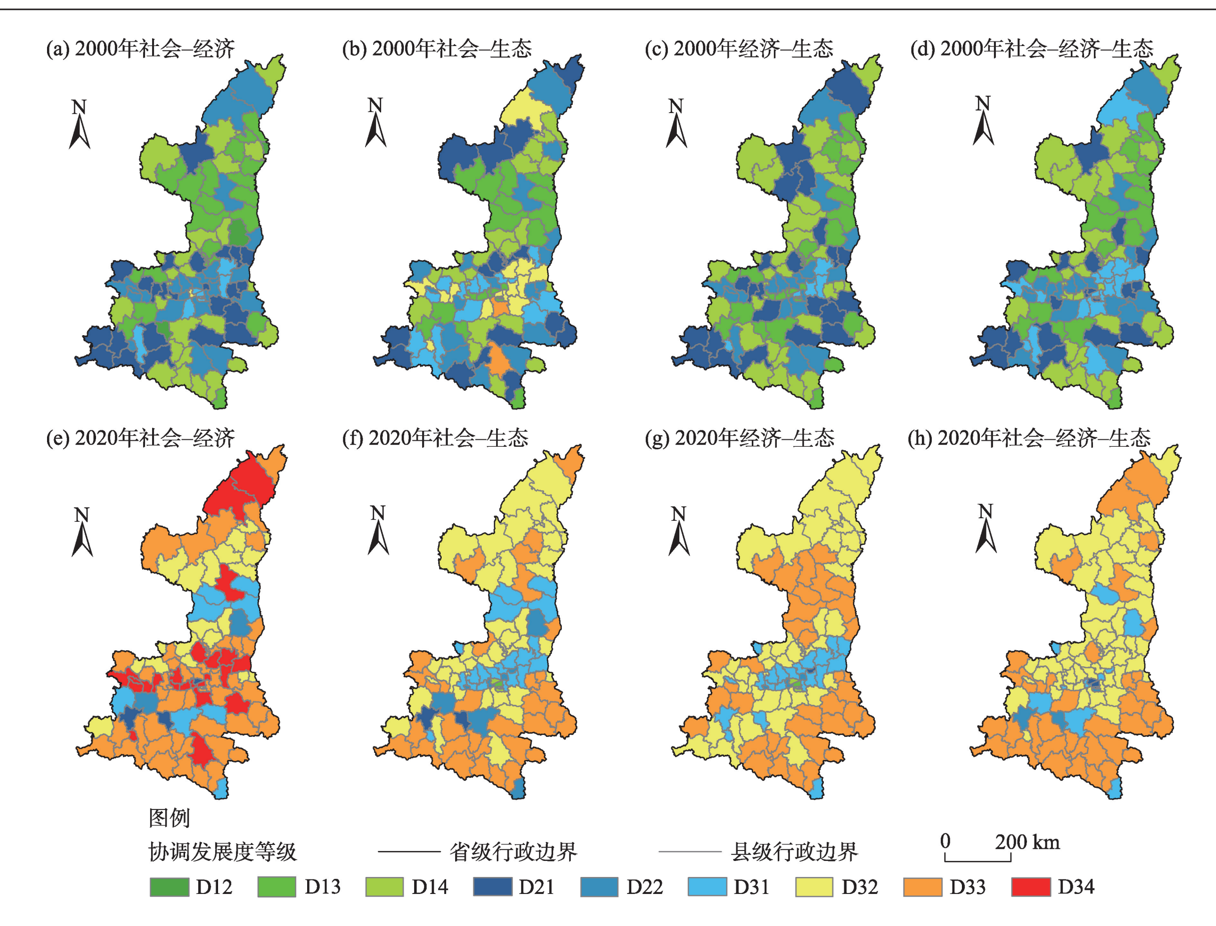
3.2.1 社会-经济子系统协调发展时空变化特征 2000—2020年陕西省社会-经济子系统协调发展度由0.422升至0.823,失调衰退、过渡调和阶段占比分别下降45.79%、39.26%,协调发展阶段占比增长至95.33%(表3),整体维持南高北低的分布格局,但空间差异减弱(图3a、e)。陕南、关中、陕北两子系统协调发展度分别由0.405、0.482、0.311上升至0.815、0.846、0.781,始终是关中>陕南>陕北。陕南社会经济基础较弱,但其在移民搬迁安置工程和循环经济规划的实施、扶贫政策的落实以及关中-天水经济区的辐射带动作用下,城镇化建设加快,经济发展动力增强,经济、社会恢复力共同提升,2020年协调发展阶段占比92.86%,良好协调县域围绕市辖区连片集中分布;关中协调发展阶段占比增长77.78%,2020年达96.30%,良好、优质协调县域集聚特征明显,是因为关中区位优势明显,人口吸纳能力强,交通、公共设施等配套更为完善,且西安市作为"增长极"辐射带动周围地区经济发展,两子系统互促作用加强;陕北2000年失调衰退阶段占比高达84.00%,随着能源化工产业发展创造的巨大经济效益对社会建设的带动作用增强,2020年96.00%的县域处于协调发展阶段,但区域内资源分布不均,人口密度较低,县域经济发展水平差异较大,南低北高的空间分布特征不变。

3.2.2 社会-生态子系统协调发展时空变化特征 2000—2020年陕西省社会-生态子系统协调发展度从0.471增至0.714,协调发展阶段比例增长57.95%(表3),形成中间低南北高的分布格局(图3b、f)。陕南、关中、陕北两子系统协调发展度分别由0.483、0.515、0.363升至0.769、0.668、0.751,由关中>陕南>陕北转变为陕南>陕北>关中。陕南是我国中部地区的生态安全屏障及南水北调中线供水工程的主要水源区,生态恢复力高,在社会恢复力的大幅提升下,协调发展阶段占比增至85.71%,以良好协调县域的集中分布为主;关中协调发展阶段比例增长40.74%,但2020年仍有11.11%的县域处于失调衰退阶段,中心低四周高的分布差异凸显,是由于以西安市为中心的城市规模扩张导致绿地

表3 2000—2020年陕西省社会-生态系统协调阶段占比

Tab. 3 Proportion of each coordination stage of social-ecological system in Shaanxi Province from 2000 to 2020 /%

耦合子系统		2000年				2020年			
		陕西省	陕南	关中	陕北	陕西省	陕南	关中	陕北
社会-经济	D1	45.79	50.00	25.93	84.00	–	–	–	–
	D2	43.93	46.43	55.56	16.00	4.67	7.14	3.70	4.00
	D3	10.28	3.57	18.52	–	95.33	92.86	96.30	96.00
社会-生态	D1	41.12	28.57	35.19	68.00	5.61	–	11.11	–
	D2	31.78	46.43	25.93	28.00	9.35	14.29	9.26	4.00
	D3	27.10	25.00	38.89	4.00	85.05	85.71	79.63	96.00
经济-生态	D1	56.07	53.57	50.00	72.00	4.67	–	9.26	–
	D2	39.25	42.86	42.59	28.00	4.67	–	9.26	–
	D3	4.67	3.57	7.41	–	90.65	100.00	81.48	100.00
社会-经济-生态	D1	48.60	50.00	33.33	80.00	–	–	–	–
	D2	36.45	39.29	44.44	16.00	7.48	7.14	11.11	–
	D3	14.95	10.71	22.22	4.00	92.52	92.86	88.89	100.00



注：D12为严重失调；D13为中度失调；D14为轻度失调；D21为濒临失调；D22为勉强协调；D31为初级协调；D32为中级协调；D33为良好协调；D34为优质协调。

图3　2000—2020年陕西省社会–生态系统协调发展空间演变

Fig. 3　Spatial evolution of coordinated development of social-ecological system in Shaanxi Province from 2000 to 2020

面积缩小、生态功能减弱，两子系统协调作用相对较弱；陕北随着退耕还林等工程的实施及社会发展水平的提升，协调发展阶段占比增至96.00%，处于中级协调的县域连片分布，南低北高的空间分布差异减弱。

3.2.3　经济–生态子系统协调发展时空变化特征

2000—2020年陕西省经济–生态子系统协调发展度从0.394增长到0.727，失调衰退、过渡调和阶段占比分别衰减51.40%、34.58%，2020年90.65%的县域处于协调发展阶段（表3），中部低南北高的空间分布差异显现（图3c、g）。陕南、关中、陕北两子系统协调发展度分别由0.388、0.420、0.346升至0.790、0.668、0.783，陕南、陕北增幅较大，协调发展度转向陕南>陕北>关中。陕南实施循环经济发展战略，生态环境与经济发展此消彼长的关系减轻，2020年全域处于协调发展阶段，中级、良好协调县域集聚分布；关中协调发展阶段占比由7.41%增至81.48%，空间上形成中部低四周高的分布特征，是由于以西安、咸阳、渭南市为主的部分县域在经济快速发展下，地类的转移及土地利用程度的增强使得生态恢复力较低，相对低等级协调发展县域呈条带状分布于此；陕北在经济跃升的同时生态环保力度大，失调衰退阶段占比大幅下降72.00%，2020年全部县域迈入协调发展阶段，以中级、良好协调为主，呈南高北低的分布格局。

3.2.4　社会–经济–生态子系统协调发展时空变化特征　2000、2020年陕西省社会–经济–生态子系统协调发展度分别为0.424、0.755，增长态势显著，协调发展阶段占比从14.95%上升至92.52%（表3），保持南高北低的空间分布特征（图3d、h）。2000—2020年陕南、关中、陕北三子系统协调发展度分别由0.418、0.468、0.337增至0.789、0.730、0.769，与社会–生态、经济–生态子系统变化一致，关中生态恢复力相对较低，与社会、经济恢复力差距变大，协调发展度逐渐低于陕南、陕北。陕南协调发展阶段占比增长82.15%，改变了区域内部分低水平协调发展度县

域连续分布的格局，良好协调县域的集聚效应凸显；关中失调衰退、过渡调和阶段占比均下降33.33%，协调发展阶段占比增至88.89%，形成中心低四周高的空间分布特征，主要是由于以西安市辖区为主的区域人类活动对生态系统的作用较强，较低的生态恢复力导致系统间协调发展度相对较低；陕北社会、经济恢复力大幅增长且绿化建设投资大，协调发展度增长态势显著，2020年区域内所有县域处于协调发展阶段，南低北高的分布差异减弱。

3.3 二元与三元子系统协调发展变化相关性分析

3.3.1 数量相关性分析 基于灰色关联分析分别计算陕西省2000—2020年社会-经济、社会-生态、经济-生态子系统与社会-经济-生态子系统协调发展度变化值间的关联程度分别为0.770、0.751、0.854。研究期间三类二元子系统与三元子系统恢复力协调发展度变化之间具有较高的关联性，影响程度为经济-生态>社会-经济>社会-生态，这表明各地区对产业的发展、环境的保护及生活质量的改善使得社会、经济及生态子系统间相互作用的程度越来越高，3个子系统之间互利互补、有序发展，在二元子系统协调发展变化的共同驱动作用下三元子系统向协调发展阶段转变。

3.3.2 全局及局部空间相关性分析 分别以2000—2020年陕西省三元子系统协调发展度变化值作为第一变量，三类二元子系统协调发展度变化值作为第二变量，运用GeoDa1.18空间分析软件计算三类二元子系统与三元子系统协调发展变化的双变量Moran's *I*(表4)，以探究两者之间变化的总体空间分布相关性。由表4可知，社会-经济、社会-生态、经济-生态子系统与社会-经济-生态子系统协调发展度变化值的双变量Moran's *I*分别为0.459、0.442、0.478，采用蒙特卡罗模拟方法进行显著性检验，三类二元子系统与三元子系统协调发展度变化值的全局Moran's *I*均通过了5%水平上的显著性检验，且|Z|均大于1.96，这表明研究期间二元子系统协调发展度变化与三元子系统协调度变化之间存在显著的空间正向关联特征，两者在空间分布上存在高-高或低-低的聚集现象。

表4 2000—2020年陕西省二元与三元子系统协调发展度变化值的双变量Moran's *I*统计值

Tab. 4 Bivariate Moran's *I* of the change value of coordinated development degree of binary and ternary subsystems in Shaanxi Province from 2000 to 2020

二元耦合子系统	社会-经济-生态		
	Moran's *I*	*P*	*Z*
社会-经济	0.459	0.001	8.1835
社会-生态	0.442	0.001	7.6834
经济-生态	0.478	0.001	8.2677

注：*P*为概率；*Z*为标准差的倍数。

全局Moran's *I*仅从整体上体现2000—2020年二元与三元子系统协调发展度变化的空间相关性，未能显示出局部的空间信息，故在此基础上通过双变量局部空间自相关分析进一步反映区域两者间的局部关联性，通过*z*检验($P<0.05$)绘制双变量局部空间自相关LISA聚类图，在空间上显示出正相关的高-高、低-低聚类及负相关的低-高、高-低聚类。总体上，2000—2020年陕西省社会-经济、社会-生态、经济-生态与社会-经济-生态子系统协调发展度变化存在集聚特征的评价单元主要以正向关联的高-高、低-低类型分布于关中和陕北，陕南两者间的相关性不显著，存在集聚特征的县域零星分布。

陕西省社会-经济子系统与三元子系统协调发展度变化存在集聚特征的评价单元有23个，陕南、关中、陕北分别占4.35%、52.17%、43.48%(图4a)。陕南中南部县域社会-经济子系统协调发展度基础水平低但提升空间大，存在集聚特征县域的三元子系统协调发展度在其周围地区社会-经济子系统协调发展度变化的影响下表现出高-高类型的正向关联特征；关中西安市及其周围地区在人口密度增加、工业企业发展等因素驱动下，社会-经济子系统协调发展度基数较高且仍具上升趋势，但变化值相对较小，对周围地区三元子系统协调发展度提升的带动作用不大，低-低类型在此分布；陕北北部能源富集区经济竞争力强且基础设施建设快，三元子系统协调发展度受到其相邻县域社会-经济子系统协调发展度的空间溢出作用，高-高类型集中分布，其中三元子系统协调发展度提升值较小的榆阳区被周围社会-经济子系统协调发展度提升显著的县域包围，表现为低-高型的负向关联特征。

陕西省社会-生态子系统与三元子系统协调发展度变化存在集聚特征的评价单元有34个，陕南、关中、陕北占比分别为2.94%、52.94%、44.12%(图4b)。陕南东南部安康市辖区生态恢复力因城镇规模扩张存在下降趋势，三元子系统协调发展度提升缓慢，其被周围地区社会-生态子系统协调发展度

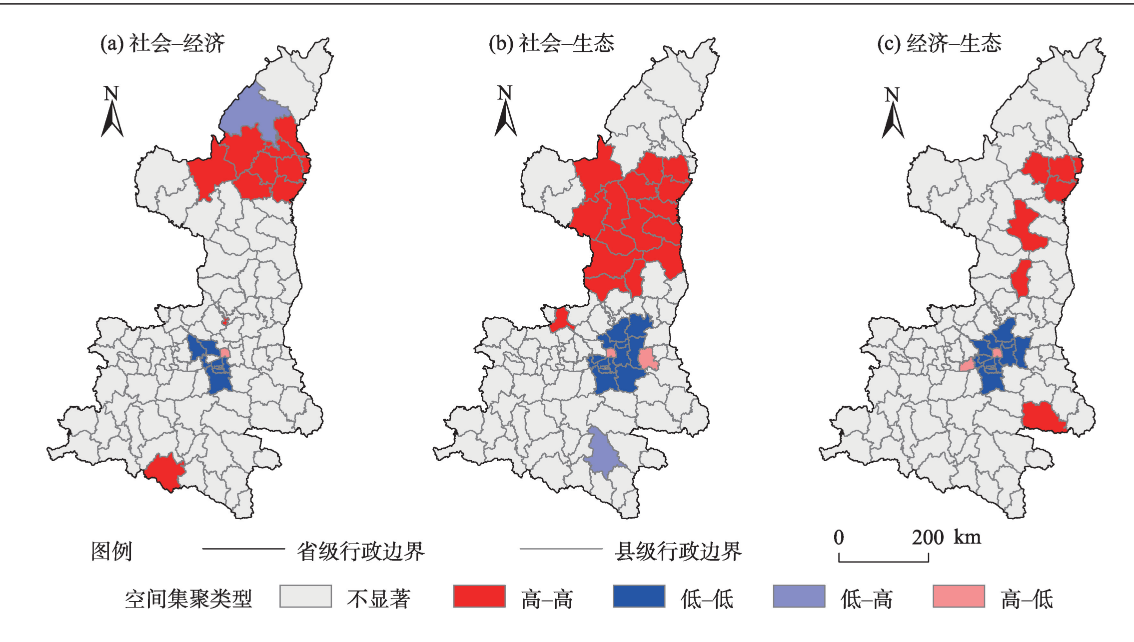


图4　2000—2020年陕西省二元与三元子系统协调发展度变化的双变量LISA分布

Fig. 4　Bivariate LISA distribution of the change value of the coordinated development degree of binary and ternary subsystems in Shaanxi Province from 2000 to 2020

提升显著的县域围绕表现出低-高型的异质性空间集聚特征；关中平原生态子系统在较强的人类活动扰动下恢复力相对较低，社会-生态子系统协调发展度增幅较小，在此产生空间关联特征的县域三元子系统协调发展变化与其周边相邻县域社会-生态子系统协调发展变化具有一定的趋同性，低-低类型集中分布；陕北南部生态环境较好，其社会资本投资额度及社会消费能力的提升促进了社会、生态子系统的协调发展，社会-生态子系统与三元子系统协调发展度协同提升，高-高类型县域连片分布。

陕西省经济-生态子系统与三元子系统协调发展度变化存在集聚特征的评价单元数量为24个，陕南、关中、陕北分别占4.17%、70.83%、25.00%（图4c）。陕南秦岭南麓区域在上升趋势明显的经济带动作用下，经济-生态子系统间的协调发展度增幅显著，促进其邻近县域三元子系统协调发展度的提升，高-高类型在此分布；关中中部偏东地区生态恢复力的提升受到经济快速发展的制约，经济-生态子系统协调发展作用缓慢，与周边三元子系统协调发展度变化较小的地区产生正向关联特征，形成低-低型空间集聚格局；陕北两者之间主要以高-高类型集聚分布在基础条件差但经济、生态恢复力提升显著的东部边缘地区，该区域在经济-生态子系统协同作用增强的同时促进了其周边地区三元子系统协调发展度的大幅提升，在此形成正向关联的高-高型集聚。

4　讨　论

陕西省作为我国“西部大开发”和“一带一路”建设的重点地区，经济发展动力强，社会生活环境和质量不断优化，各区域社会、经济恢复力协同提升显著且差距逐渐缩小。同时，陕西省是我国率先实施“退耕还林”生态建设工程的省份之一，生态建设资金投入力度大，在生态政策影响下生态恢复力较强，但随着能源工业发展、城镇化建设加快及造林面积减少，生态恢复力呈微弱的下降趋势，且省内空间异质性较强，研究期间关中生态恢复力始终低于陕南、陕北，这与丁振民等[44]基于陕西省土地利用转移情况对关中平原建设用地面积不断扩大且主要由耕地转入的分析相契合。

社会-生态系统内部失调和外部失衡可能是系统内任一子系统的滞后引起的，各二元子系统同步协调发展是三元子系统协调发展水平提升的前提[7]，陕西省社会、经济恢复力的显著增强有力地推动了各区域二元子系统间的有序发展，三元子系统协调发展度在各二元子系统协调发展程度共同上升的驱动下向协调发展阶段转变，其中经济-生态子系统协调发展度变化与三元子系统协调发展度变化间的数量及空间关联性均高于社会-经济和社会-生态子系统，说明在保持经济恢复力不断向好发展

的趋势下，促进各区域生态恢复力的协同提升对社会-生态系统整体协调发展至关重要，如唐晓灵等[45]所述，陕西省在发展过程中要以经济建设为中心，推动区域经济与生态环境协调发展、共同进步。针对生态恢复力在陕西省社会-生态系统协调发展中的重要性，本研究考虑地区不同的生态本底条件提出几点提升各区域生态恢复力协调发展的建议：(1) 陕南地区自然生态条件优越但敏感性高，该地区应以生态保护为主，因地制宜发展生态产业；(2) 关中地区城镇建设集中，人类活动强度大，应加强生态修复提高区域土地利用效率，扩展城市绿地空间，减轻社会、经济发展对生态环境造成的负面影响；(3) 陕北地区能源化工产业突出，经济高速发展，但水土流失严重、生态环境脆弱，该地区应继续做好"退耕还林"成果巩固工作，坚持生态环境建设。

尽管本研究基于恢复力测度结果对陕西省社会-生态系统的协调发展程度进行了多维分析，但依然存在一些不足，复杂社会-生态系统的演变历程需要长时间序列的恢复力测度，本研究只分析了2000—2020年的社会-生态系统变化格局，时间跨度较小；恢复力测度指标体系构建尚未形成统一的范式，本文结合社会经济统计数据与土地利用数据，综合多层面进行指标的选择，但限于数据的可获得性，还存在指标选取粗放及不全面的问题。在今后的研究中应扩大时间范围，建立更完整的指标体系，进一步探索社会-生态系统恢复力协调发展的阶段性特征及影响机理，为区域建设与适应性管理提供更客观的理论支持。

5 结 论

(1) 2000—2020年陕西省社会-生态系统恢复力显著提升，社会、经济子系统恢复力显著增强，生态子系统恢复力呈微弱的下降趋势。

(2) 研究期间，陕西省社会-经济、社会-生态、经济-生态及社会-经济-生态子系统协调发展度均呈上升趋势，社会-经济子系统协调阶段提升的空间范围不断扩大，南高北低的空间分布差异减弱；社会-生态、经济-生态子系统逐渐形成中部低南北高的协调发展格局；社会-经济-生态子系统协调发展度整体维持南高北低的空间分布特征。

(3) 陕西省二元子系统协调发展变化在数量及空间上与三元子系统协调发展变化有较大的关联且存在较大的时空分异，主要以正向关联的高-高、低-低类型评价单元在省域北部和中部的集中分布为主，南部两者间相关性不显著，存在集聚特征的评价单元零星分布。

参考文献(References)

[1] 宋爽, 王帅, 傅伯杰, 等. 社会-生态系统适应性治理研究进展与展望[J]. 地理学报, 2019, 74(11): 2401-2410. [Song Shuang, Wang Shuai, Fu Bojie, et al. Study on adaptive governance of social-ecological system: Progress and prospect[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(11): 2401-2410.]

[2] 刘志敏, 叶超. 社会-生态韧性视角下城乡治理的逻辑框架[J]. 地理科学进展, 2021, 40(1): 95-103. [Liu Zhimin, Ye Chao. A logical framework of rural-urban governance from the perspective of social-ecological resilience[J]. Progress in Geography, 2021, 40(1): 95-103.]

[3] Cumming G S, Barnes G, Perz S, et al. An exploratory framework for the empirical measurement of resilience[J]. Ecosystems, 2005, 8(8): 975-987.

[4] Walker B H, Holling C S, Carpenter S R, et al. Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems[J]. Ecology and Society, 2004, 9(2): 5-13.

[5] Holling C S. Understanding the complexity of econoogical and social systems[J]. Ecosystems, 2001, 4(5): 390-405.

[6] 黄晓军, 王博, 刘萌萌, 等. 社会-生态系统恢复力研究进展——基于CiteSpace的文献计量分析[J]. 生态学报, 2019, 39(8): 3007-3017. [Huang Xiaojun, Wang Bo, Liu Mengmeng, et al. Process in social and ecological system resilience based on CiteSpace method[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(8): 3007-3017.]

[7] 展亚荣, 盖美. 滨海旅游地社会-生态系统恢复力测度及协调发展研究[J]. 地域研究与开发, 2018, 37(5): 158-164. [Zhan Yarong, Gai Mei. Study on measurement and coordinated development of socio-ecological system resilience in coastal tourism destination[J]. Areal Research and Development, 2018, 37(5): 158-164.]

[8] 唐波, 肖欣. 粤北山区社会-生态-经济系统恢复力及其协调度[J]. 水土保持通报, 2020, 40(5): 218-226, 241. [Tang Bo, Xiao Xin. Resilience and coordination degree of socio-ecological-economic system in mountainous areas of northern Guangdong Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(5): 218-226, 241.]

[9] Kates R W, Clark W C, Corell R, et al. Environment and development-sustainability science[J]. Science, 2001, 292(5517): 641-642.

[10] Hu M M, Zhang J M, Huang J L. Assessing social-ecological system resilience in mainland China[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2018, 27(3): 1085-1096.

[11] 陈娅玲, 杨新军. 西藏旅游社会-生态系统恢复力研究[J]. 西北

大学学报(自然科学版), 2012, 42(5): 827-832. [Chen Yaling, Yang Xinjun. The resilience of Tibet tourism social-ecological systems[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2012, 42(5): 827-832.]

[12] 胡蒙蒙, 张军民, 黄锦楼, 等. 鄂尔多斯社会-生态系统恢复力评价及驱动机制研究[J]. 水土保持研究, 2017, 24(4): 191-197, 203. [Hu Mengmeng, Zhang Junmin, Huang Jinlou, et al. Study on evaluation and driver of socio-ecological system resilience in Ordos [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(4): 191-197, 203.]

[13] 张行, 梁小英, 刘迪, 等. 生态脆弱区社会-生态景观恢复力时空演变及情景模拟[J]. 地理学报, 2019, 74(7): 1450-1466. [Zhang Hang, Liang Xiaoying, Liu Di, et al. The resilience evolution and scenario simulation of social-ecological landscape in the fragile area[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(7): 1450-1466.]

[14] 李瑞, 郜玉兰, 王晨, 等. 旅游地社会-生态系统恢复力测度及优化对策——以贵阳市花溪区为例[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2018, 36(5): 103-108. [Li Rui, Tai Yulan, Wang Chen, et al. Measurement of resilience of social-ecological system on tourist destination and its optimizing strategies: A case study of Guiyang[J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences Edition), 2018, 36(5): 103-108.]

[15] Yang Y J, Li Y, Chen F, et al. Regime shift and redevelopment of a mining area's socio-ecological system under resilience thinking: A case study in Shanxi Province, China[J]. Environment Development & Sustainability, 2019, 21(5): 2577-2598.

[16] Enfors E I, Gordon L J. Analysing resilience in dryland agro-ecosystems: A case study of the Makanya catchment in Tanzania over the past 50 years[J]. Land Degradation and Development, 2007, 18: 680-696.

[17] Sajjad M, Li Y, Li Y F, et al. Integrating typhoon destructive potential and social-ecological systems towards resilient coastal communities[J]. Earth's Future, 2019, 7(7): 805-818.

[18] 侯彩霞, 周立华, 文岩, 等. 生态政策下草原社会-生态系统恢复力评价——以宁夏盐池县为例[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(8): 117-126. [Hou Caixia, Zhou Lihua, Wen Yan, et al. Evaluation of social-ecological systems resilience in ecological policy: A case study in Yanchi, Ningxia, China[J]. China Population, Resources and Environment, 2018, 28(8): 117-126.]

[19] 周晓芳. 社会-生态系统恢复力的测量方法综述[J]. 生态学报, 2017, 37(12): 4278-4288. [Zhou Xiaofang. Measuring methods for the resilience of social-ecological systems[J]. Journal of Ecology, 2017, 37 (12): 4278-4288.]

[20] Folke C, Carpenter S, Elmqvist T, et al. Resilience and sustainable development: Building adaptive capacity in a world of transformations[J]. Ambio, 2002, 31(5): 437-440.

[21] Zurlini G, Amadio V, Rossi O. A landscape approach to biodiversity and biological health planning: The map of Italian nature[J]. Ecosyst Health, 1999, 5(4): 296-311.

[22] Carpenter S R, Walker B, Anderies J M, et al. From metaphor to measurement: Resilience of what to what?[J]. Ecosystems, 2001, 4 (8): 765-781.

[23] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2000: 8-21. [Zhao Keqin. Set pair analysis and its prelimiary application[M]. Hangzhou: Zhejiang Science and Technology Press, 2000: 8-21.]

[24] 苏飞, 陈媛, 张平宇. 基于集对分析的旅游城市经济系统脆弱性评价——以舟山市为例[J]. 地理科学, 2013, 33(5): 538-544. [Su Fei, Chen Yuan, Zhang Pingyu. Vulnerability assessment of tourism city's economic system based on the set pair analysis: A case study of Zhoushan City[J]. Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(5): 538-544.]

[25] 郑华伟, 张锐, 孟展, 等. 基于PSR模型与集对分析的耕地生态安全诊断[J]. 中国土地科学, 2015, 29(12): 42-50. [Zheng Huawei, Zhang Rui, Meng Zhan, et al. Diagnosis on cultivated land ecological security based on the PSR model and set pair analysis [J]. China Land Science, 2015, 29(12): 42-50.]

[26] 何美丽, 刘浪, 王宏伟, 等. 基于集对分析的工程评标未知权重多属性决策[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(10): 4057-4062. [He Meili, Liu Lang, Wang Hongwei, et al. Unknown weight multiple attribute decision for engineering appraisal bidding based on set pair analysis[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2012, 43(10): 4057-4062.]

[27] 王群, 陆林, 杨兴柱. 千岛湖社会-生态系统恢复力测度与影响机理[J]. 地理学报, 2015, 70(5): 779-795. [Wang Qun, Lu Lin, Yang Xingzhu. Study on measurement and impact mechanism of socio-ecological system resilience in Qiandao Lake[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(5): 779-795.]

[28] 李观凤, 焦华富, 王群. 干旱区文化旅游地社会-生态系统恢复力年际变化及影响因素——以甘肃省敦煌市为例[J]. 干旱区地理, 2022, 45(3): 935-945. [Li Guanfeng, Jiao Huafu, Wang Qun. Interannual variation and influencing factors of social-ecological system resilience of cultural tourism destination in arid area: A case of Dunhuang City, Gansu Province[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(3): 935-945.]

[29] 叶文丽, 杨新军, 吴孔森, 等. 黄土高原社会-生态系统恢复力时空变化特征与影响因素分析[J]. 干旱区地理, 2022, 45(3): 912-924. [Ye Wenli, Yang Xinjun, Wu Kongsen, et al. Spatio-temporal characteristics and influencing factors of social-ecological system resilience in the Loess Plateau[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(3): 912-924.]

[30] 陈明星, 陆大道, 张华. 中国城市化水平的综合测度及其动力因子分析[J]. 地理学报, 2009, 64(4): 387-398. [Chen Mingxing, Lu Dadao, Zhang Hua. Comprehensive evaluation and the driving factors of China's urbanization[J]. Acta Geographica Sinica, 2009, 64 (4): 387-398.]

[31] 余中元, 李波, 张新时. 社会生态系统及脆弱性驱动机制分析[J]. 生态学报, 2014, 34(7): 1870-1879. [Yu Zhongyuan, Li Bo, Zhang

Xinshi. Social ecological system and vulnerability driving mechanism analysis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(7): 1870-1879.]

[32] 王群, 杨万明, 朱跃, 等. 贫困区旅游地社会-生态系统恢复力时空分异研究——以安徽境内大别山区12个贫困县(市)为例[J]. 地理科学, 2021, 41(6): 1030-1038. [Wang Qun, Yang Wanming, Zhu Yue, et al. Spatio-temporal differentiation of tourism socio-ecological system resilience in poor area: A case study of 12 poverty-stricken counties in the Dabie Mountain of Anhui Province[J]. Scientia Geographica Sinica, 2021, 41(6): 1030-1038.]

[33] 孙东琪, 朱传耿, 周婷. 苏、鲁产业结构比较分析[J]. 经济地理, 2010, 30(11): 1847-1853. [Sun Dongqi, Zhu Chuangeng, Zhou Ting, et al. Comparative study on the industrial structure of Jiangsu Province and Shandong Province[J]. Economic Geography, 2010, 30(11): 1847-1853.]

[34] 耿艺伟, 陈伟强, 张金鑫, 等. 河南省沿黄干流地区社会-生态-生产景观恢复力演化特征及情景模拟[J]. 水土保持通报, 2021, 41(5): 181-190. [Geng Yiwei, Chen Weiqiang, Zhang Jinxin, et al. Evolution characteristics and scenario simulation of social-ecological production landscape resilience in areas along mainstream of Yellow River in Henan Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(5): 181-190.]

[35] 乌宁巴特, 刘新平, 马相平. 叶尔羌河流域土地生态脆弱性差异评价[J]. 干旱区地理, 2020, 43(3): 849-858. [Wu Ningbart, Liu Xinping, Ma Xiangping. Evaluation on the difference of land ecological vulnerability in the Yarkant River Basin[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(3): 849-858.]

[36] 庄大方, 刘纪远. 中国土地利用程度的区域分异模型研究[J]. 自然资源学报, 1997, 12(2): 10-16. [Zhuang Dafang, Liu Jiyuan. Study on the model of regional differentiation of land use degree in China[J]. Journal of Natural Resources, 1997, 12(2): 10-16.]

[37] 钞锦龙, 李乐乐, 杨朔, 等. 汾河流域城市化与水资源耦合协调关系研究[J]. 地理科学, 2022, 42(3): 487-496. [Chao Jinlong, Li Lele, Yang Shuo, et al. Coupling and coordination relation between urbanization and water resources in the Fenhe River Basin[J]. Scientia Geographica Sinica, 2022, 42(3): 487-496.]

[38] 付晶莹, 郜强, 江东, 等. 黑土保护与粮食安全背景下齐齐哈尔市国土空间优化调控路径[J]. 地理学报, 2022, 77(7): 1662-1680. [Fu Jingying, Gao Qiang, Jiang Dong, et al. Optimal regulation of spatial planning in the context of black soil preservation and food security in Qiqihar[J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(7): 1662-1680.]

[39] 方遥, 徐帆, 秦萧, 等. 省际毗邻区协同发展分析与规划应对——以宁滁毗邻核心区为例[J]. 自然资源学报, 2022, 37(6): 1609-1625. [Fang Yao, Xu Fan, Qin Xiao, et al. Response of coordinated development analysis and planning to inter-provincial adjacent areas: Taking Nanjing-Chuzhou core area as an example[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(6): 1609-1625.]

[40] 王淑佳, 孔伟, 任亮, 等. 国内耦合协调度模型的误区及修正[J]. 自然资源学报, 2021, 36(3): 793-810. [Wang Shujia, Kong Wei, Ren Liang, et al. Research on misuses and modification of coupling coordination degree model in China[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(3): 793-810.]

[41] 沈中健, 曾坚, 梁晨. 闽南三市绿地景观格局与地表温度的空间关系[J]. 生态学杂志, 2020, 39(4): 1309-1317. [Shen Zhongjian, Zeng Jian, Liang Chen. Spatial relationship of greenspace landscape pattern with land surface temperature in three cities of southern Fujian[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(4): 1309-1317.]

[42] 李俊翰, 高明秀. 滨州市生态系统服务价值与生态风险时空演变及其关联性[J]. 生态学报, 2019, 39(21): 7815-7828. [Li Junhan, Gao Mingxiu. Spatiotemporal evolution and correlation analysis of ecosystem service values and ecological risk in Binzhou[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(21): 7815-7828.]

[43] 雷金睿, 陈宗铸, 吴庭天, 等. 海南岛东北部土地利用与生态系统服务价值空间自相关格局分析[J]. 生态学报, 2019, 39(7): 2366-2377. [Lei Jinrui, Chen Zongzhu, Wu Tingtian, et al. Spatial autocorrelation pattern analysis of land use and the value of ecosystem services in northeast Hainan island[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(7): 2366-2377.]

[44] 丁振民, 姚顺波. 陕西省耕地转移对生态系统服务价值的影响[J]. 资源科学, 2019, 41(6): 1070-1081. [Ding Zhenmin, Yao Shunbo. Effects of cultivated land transition on ecosystem service value in Shaanxi Province of China[J]. Resources Science, 2019, 41(6): 1070-1081.]

[45] 唐晓灵, 杜莉. 基于引力模型的区域经济发展与生态环境耦合协调研究——以陕西省为例[J]. 生态经济, 2020, 36(7): 164-169. [Tang Xiaoling, Du Li. Research on coupling coordination between regional economic development and ecological environment based on gravity model: Taking Shaanxi Province as an example[J]. Ecological Economy, 2020, 36(7): 164-169.]

Spatiotemporal evolution of the coordinated development of regional social-ecological system resilience: A case study of Shaanxi Province

HUANG Jiao[1,2], CHEN Hai[1,2], WANG Jiayu[1,2], BAI Xiaojuan[1,2]

(1. College of Urban and Environmental Science, Northwest University, Xi'an 710127, Shaanxi, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Xi'an 710127, Shaanxi, China)

Abstract: Driven by multiple factors such as population growth, resource development, and urbanization, resilience provides a new research perspective for the sustainable development of regional social-ecological systems. To clarify the trend of the coordinated development of the social-ecological system in Shaanxi Province, northwest China from the perspective of resilience and provide theoretical support for the sustainable development of the regional social-ecological system based on the three subsystems of society, economy, and ecology, comprehensively considering the vulnerability and coping capacity of the system, a resilience evaluation index system was constructed. The social-ecological system resilience of 107 county-level administrative units in Shaanxi Province was measured using set-pair analysis. According to the results of the resilience measurement, the coupling coordination degree model was used to analyze the coordinated development degree of binary (social-economic, social-ecological, and economic-ecological) and ternary (social-economic-ecological) subsystems. The spatiotemporal evolution characteristics of the coordinated development degree of the subsystems from 2000 to 2020 were revealed at the regional level. The bivariate spatial autocorrelation model was introduced to further explore the quantitative and spatial correlation characteristics of the coordinated development degree changes in the binary and ternary subsystems. The results showed the following: (1) During the study period, the social and economic resilience of Shaanxi Province increased significantly, ecological resilience showed a weak downward trend, and social-ecological system resilience increased from 0.303 to 0.779. (2) The coordinated development degree of the subsystems showed an upward trend; the coordinated development degree of the social-economic subsystem increased from 0.422 to 0.823, and the difference between the high in the south and low in the north weakened. The coordinated development degree of social-ecological and economical-ecological subsystems increased from 0.471 and 0.394 to 0.714 and 0.727, respectively. These two types of binary subsystems formed a coordinated development pattern of low in the middle and high in the north and south, respectively. The coordinated development degree of social-economic-ecological subsystem increased from 0.424 to 0.755 and generally maintained the spatial distribution characteristics of high in the south and low in the north. (3) The changes in the coordinated development of the social-economic, social-ecological, and economic-ecological subsystems were positively correlated with the change in the coordinated development of the social-economic-ecological subsystem in quantity and space. There were obvious spatial agglomeration characteristics in the coordinated development degree changes of the three types of binary and ternary subsystems. The positive correlation of high-high and low-low type evaluation units was mainly distributed in the northern and middle parts of Shaanxi Province, whereas the correlation was not significant in the southern part; the evaluation units with agglomeration characteristics were scattered.

Key words: social-ecological system resilience; coordinated development; bivariate correlation; Shaanxi Province